

## 個別要素法を用いたじゃかごの耐震解析

香川大学大学院 学生員 ○板東 翔吾

香川大学工学部 フェロー会員 野田 茂

## 1. まえがき

じゃかご工法は、河川、海岸、治山などの土木事業で選定され、耐久性に優れた高機能めっき線で構成されたかごに石を詰め、ブロックとして擁壁、法面工などに用いられている。しかし、経験に依存した伝統的工法であるため、これまで学術上の理論的評価が行われてこなかった。じゃかごとその集合体は、その構造が複雑なため、3次元動的挙動を正確に解析できるツールがこれまでなかった。そこで本研究では、粒状体モデルを用いた個別要素法による粒状体挙動解析コードを新たに開発し、数値解析上の評価を行うことにより、建設資材としてのじゃかごの性能を定量的に解明する。

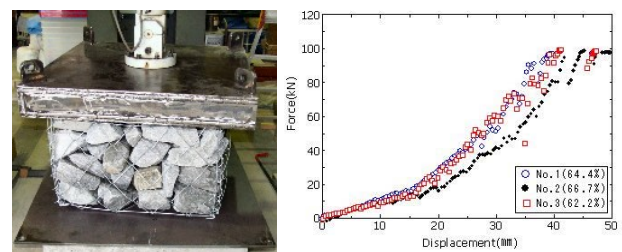
## 2. 力学特性試験

数値モデルの作成に当たり、個別要素法解析に必要なパラメータを決定する上で力学特性試験を実施した。まず、中詰石の機械的性質および変形特性を求めるため、圧縮載荷試験を行った。試験は、円柱に整形した中詰石の岩石供試体に圧縮力を与え、破壊に至る過程におけるひずみを計測した。測定結果から圧縮荷重と変位の関係を求め、断面積で除した応力-ひずみ曲線より一軸圧縮強度を算定した。同様に、金網を構成する鉄線（線径 $\phi=4\text{mm}$ ）についても引張試験を実施し、引張荷重と変位の関係、引張応力とひずみの関係を調べた。その他の実験も勘案し、これらの試験結果からモデル化に必要なパラメータを決定した。

じゃかごの変形特性を把握するために単一ブロックの載荷試験を行い、数値解析結果との比較検討の参考とする。ここでは図-1(a)のごとく縮小モデルを考え、試験体の寸法を $500\times 800\times 800\text{ mm}$ とした。じゃかごの上面を十分に剛な載荷板を介して載荷速度 $0.5\text{ mm/s}$ で下方に押し込み、その際の載荷荷重と鉛直変位を測定した。破壊前の荷重-変位曲線を図-1(b)に示す。ほぼ弾性的な挙動を示していることがわかる。

次に、じゃかごの共振周波数を求めるため、振動台実験を用いたスイープ試験を実施した。試験に用いたじゃかご

は実物大で、その寸法は $500\times 1200\times 2000\text{ mm}$ である。加速度センサーを石、金網、加振テーブルに設置し、じゃかご各部の加速度を測定した。スイープ試験より得られた共振曲線の一例を図-2に示す。じゃかご単一ブロックの共振周波数が $20\text{ Hz}$ 付近にあることがわかる。じゃかごの共振周波数は一般的に見られる実地震波の卓越周波数よりもかなり高周波である。このことは、じゃかごが実地震波と共振する可能性が極めて低く、耐震性に優れていることを意味する。



(a) 試験状況

(b) 荷重-変位曲線

図-1 じゃかごの載荷試験

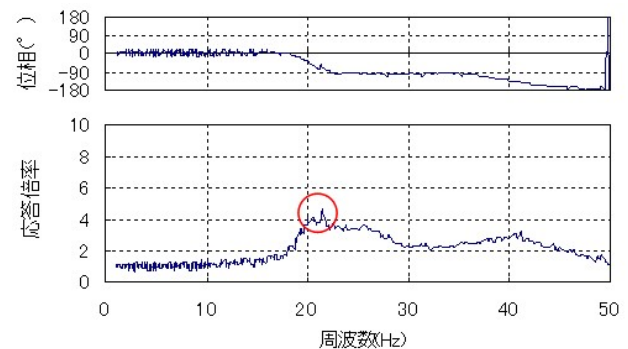


図-2 共振曲線の代表例

## 3. じゃかごのモデル化

数値解析において対象としたじゃかごは上記振動台実験に用いたものと同一である。本研究では、個別要素法を用いることにより、図-3に示すように、金網のかごとその中に詰められた石をそれぞれモデル化し、じゃかごの単一ブロックを構成した。石については、空隙率が $35\%$ となるように、 $12\sim 15\text{ cm}$ の異なる粒径の粒状体をランダムに発生させた。ただし、粒状体要素には実際の石に起こりうる亀裂

キーワード：じゃかご、個別要素法、模型実験、耐震解析

連絡先：〒761-0396 香川県高松市林町 2217 - 20, Tel &amp; Fax : 087-864-2153

## 土木学会第 62 回年次学術講演会（平成 19 年 9 月）

や破壊などの現象を反映させていない。金網の径は $\phi=4\text{mm}$ 、金網かごの網目は $13\text{cm}$ とした。

本研究の特徴は球状の粒状体要素を接着させることによって金網をミクロに表現したことにある。これにより、隣接粒子が接触しているときには、接着の考え方が適用され、引張、せん断、曲げに抵抗できるようになる。

じゃかごの単一ブロックの作成手順は次の通りである。まず、金網かごと同じ寸法の剛体壁の箱を生成し、その内側に最終的な粒径よりも小さい半径の中詰石モデルの粒状体を発生させる。次に、設定した空隙率になるまで粒子半径を増加させ、重力加速度を与えた後、安定になるまで計算を繰り返す。その後、剛体壁を消去し金網のモデルに置き換え、金網かごが中詰石の動きを制限し、モデル全体が安定状態になるまで工夫を施した。

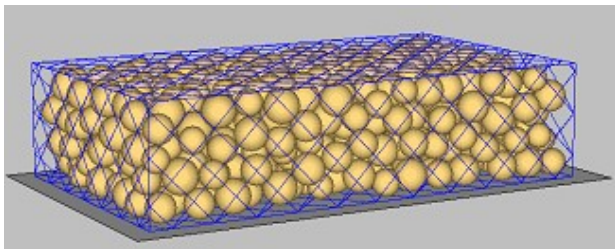


図-3 じゃかご単一ブロックのモデル化

#### 4. 圧縮解析

じゃかごの圧縮解析を行うため、側面は拘束せず、上下面に剛な板を生成した。上面の板に鉛直下向き速度を付与し、解析によって載荷荷重と鉛直変位の関係を求めた。ここでは計算時間の都合上、上板の載荷速度を $1\text{m/s}$ とし、鉛直変位が $60\text{mm}$ に達するまで解析を行った。

解析結果の荷重－変位曲線を図-4に示す。鉛直変位が $7.5\text{mm}$ と $17.5\text{mm}$ 付近で、曲線に大きな変化が見られる。これは、圧縮により石の配置が変化するとともに、金網かごの変形に伴い、石が外側へ孕み出すことによって強度が減少したことに起因している。大きな圧縮荷重を与えても、金網は破断することなく、じゃかごが正常に機能していることが理解できる。

#### 5. 振動解析

金網をミクロにモデル化したので、粒子サイズの影響から計算時間間隔が極めて小さくなり、現実的な時間で実地震波による耐震解析を行うことは容易でない。そこで、弱軸方向への入力波として共振周波数に近い周波数よりなる調和波を与えた解析を実施した。入力波の周波数は、前述

したスワイプ試験の結果を勘案して決めた。

最大速度 $30\text{kin}$ 、周波数 $20\text{Hz}$ の調和波を入力した場合、じゃかご単一ブロックの底面、中面、上面での速度応答は図-5のようになる。解析上は必ずしも実際の共振周波数に対応していないが、モデル化は大過ないと言える。

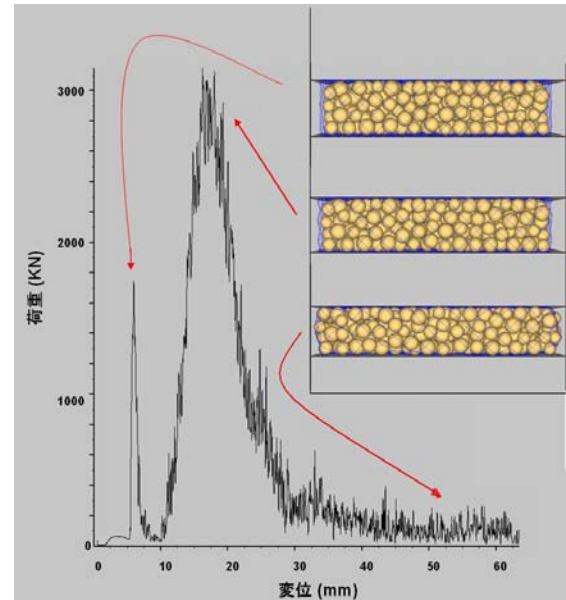
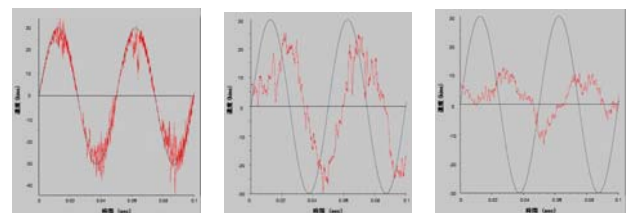


図-4 載荷荷重と鉛直変位の関係



(a) 底面

(b) 中面

(c) 上面

図-5 各計測点の速度応答

#### 6. あとがき

本研究では、粒状体を接着させることによって金網をモデル化する新たな方法を提案し、個別要素法によってじゃかごの耐震解析を実施した。現実的なパラメータを与えて圧縮解析・振動解析を行った結果、別途実施した圧縮試験や振動実験の結果と遜色なく、提案したモデル化の妥当性・じゃかごの耐震性を解明することができた。これにより、じゃかごの力学特性や耐震性能を解析できる基本的なツールを完成できたものと考えられる。

#### 7. 謝辞

本研究はNEDOの大学発事業創出実用化研究開発事業の一環として実施した。研究の実施に当たってはテクノネットワーク四国、瀬戸内金網商工の支援を受けた。ここに関係機関に深甚なる謝意を表す。